

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

①① N° de publication :

2 780 798

(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

②① N° d'enregistrement national :

98 09018

⑤① Int Cl<sup>7</sup> : G 06 F 17/00

①②

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②② Date de dépôt : 01.07.98.

③① Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public de la  
demande : 07.01.00 Bulletin 00/01.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du  
présent fascicule*

⑥① Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

⑦① Demandeur(s) : INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE  
— FR et ELF EXPLORATION PRODUCTION — FR.

⑦② Inventeur(s) : HU LIN YING, HAAS ANDRE et ROG-  
GERO FREDERIC.

⑦③ Titulaire(s) :

⑦④ Mandataire(s) :

⑤④ METHODE POUR DEFORMER GRADUELLEMENT UN MODELE STOCHASTIQUE D'UN MILIEU  
HETEROGENE TEL QU'UNE ZONE SOUTERRAINE.

⑤⑦ - Méthode pour déformer de façon graduelle, en tota-  
lité ou localement un modèle stochastique de type gaussien  
ou apparenté d'un milieu hétérogène tel qu'une zone sou-  
terraine, contraint par un ensemble de paramètres relatifs à  
la structure du milieu.

- La méthode comporte le tirage d'un nombre  $p$  au moins  
égal à deux, de réalisations indépendantes d'une partie au  
moins du modèle choisi du milieu, parmi toutes les réalisa-  
tions possibles et une combinaison linéaire de ces  $p$  réalisa-  
tions avec  $p$  coefficients tels que la somme de leurs carrés  
est égale à 1. Cette combinaison linéaire constitue une nou-  
velle réalisation du modèle stochastique et elle se déforme  
graduellement lorsque l'on modifie graduellement les  $p$   
coefficients. La méthode peut comporter plus généralement  
plusieurs étapes itératives de déformation graduelle, avec  
combinaison à chaque étape d'une réalisation composite  
obtenue à l'étape précédente avec  $q$  nouvelles réalisations  
indépendantes tirées de l'ensemble des réalisations. La mé-  
thode donne la possibilité de déformer graduellement des  
réalisations d'un modèle représentatif du milieu tout en mo-  
difiant les paramètres statistiques relatifs à la structure du  
milieu. La méthode permet aussi des déformations graduel-  
les individuelles de différentes parties du modèle tout en

préservant la continuité entre ces parties.

- Application à la construction de modèles stochastiques  
de réservoirs contraints à des données non linéaires (don-  
nées liées à l'écoulement des fluides).

FR 2 780 798 - A1



La présente invention concerne une méthode pour déformer graduellement partiellement ou en totalité des réalisations ou représentations d'un milieu hétérogène tel qu'une zone souterraine, qui sont toutes la traduction d'un modèle stochastique de type gaussien ou apparenté  
5 c'est-à-dire incluant un modèle gaussien sous jacent.

La méthode selon l'invention trouve des applications notamment dans la construction d'un modèle stochastique d'une formation souterraine, contraint par des données non linéaires.

#### ART ANTERIEUR

10 Des exemples d'utilisation de modèles gaussiens pour modéliser la structure du sous-sol sont décrits par :

- Journel, A.G. and Huijbregts Ch.J.: "Mining Geostatistics", Academic Press, 1978 ; ou
- Matheron, G. et al : « Conditional Simulation of the Geometry of Fluvio-  
15 deltaic Reservoirs », paper SPE 16753 ; SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, 1987.

La contrainte des modèles stochastiques à un ensemble de données non linéaires peut être considérée comme un problème d'optimisation avec définition d'une fonction objectif mesurant l'accord entre des données  
20 mesurées dans le milieu à modéliser et des réponses correspondantes du modèle stochastique, et minimisation de cette fonction. Une bonne méthode de déformation se doit de respecter les trois caractéristiques suivantes : a) le modèle déformé doit être une réalisation du modèle stochastique ; b) il doit produire une fonction objectif régulière pouvant être traitée par un algorithme  
25 d'optimisation efficace ; et c) la déformation doit être telle que l'on puisse couvrir en entier l'espace des solutions.

Parmi les méthodes de déformation connues, on peut citer la méthode selon laquelle on échange les valeurs en deux points d'une réalisation du modèle stochastique i.e. d'une réalisation ou représentation du milieu étudié traduisant le modèle. Cette méthode est utilisée dans la technique dite de  
5 « recuit simulé » bien connue des spécialistes. Un exemple en est décrit par :

- Deutch, C.: "Conditioning reservoir models to well test information", in Soares, A. (ed.), Geostatistics Troia'92, pp.505-518, Kluwer Academic Pub., 1993.

10 Comme un échange arbitraire viole la continuité spatiale d'un modèle stochastique, il est nécessaire d'inclure un variogramme dans la fonction objectif, ce qui rend l'optimisation très fastidieuse.

Une autre méthode connue est la méthode dite des points pilotes, qui est décrite par exemple par :

- 15 - de Marsily, G. et al : « Interpretation of Interference Tests in a Well Field using Geostatistical Techniques to fit the Permeability Distribution in a Reservoir Model » in Verly, G. et al (ed.), Geostatistics for Natural Resources Characterization, Part 2, 831-849, D. Reidel Pub. Co, 1984.

Cette méthode consiste essentiellement à choisir un certain nombre  
20 de points d'une réalisation (représentation) initiale, à calculer les dérivées (les coefficients de sensibilité) de la fonction objectif par rapport aux valeurs en ces points, et ensuite à modifier les valeurs aux points pilotes pour tenir compte de ces coefficients de sensibilité. Une nouvelle réalisation est formée par la méthode connue dite de krigeage conditionnel. Il peut en résulter  
25 qu'une modification des valeurs aux points pilotes en utilisant les coefficients de sensibilité, conduise à une modification induite du variogramme même si le

krigeage conditionnel est utilisé ensuite, en particulier quand le nombre de points pilotes devient important.

## DEFINITION DE L'INVENTION

La méthode selon l'invention permet d'effectuer une déformation  
5 graduelle au moins partielle de réalisation (ou représentation) d'un modèle  
stochastique de type gaussien ou apparenté, d'un milieu hétérogène tel  
qu'une zone souterraine, contraint par un ensemble de paramètres relatifs à  
la structure du milieu. Elle est caractérisée en ce qu'elle comporte le tirage  
d'un nombre  $p$  au moins égal à deux, de réalisations indépendantes d'une  
10 partie au moins du modèle choisi du milieu, parmi toutes les réalisations  
possibles et une combinaison linéaire de ces  $p$  réalisations avec  $p$   
coefficients tels que la somme de leurs carrés est égale à 1. Cette  
combinaison linéaire constitue une nouvelle réalisation du modèle  
stochastique et elle se déforme graduellement lorsque l'on modifie  
15 graduellement les  $p$  coefficients.

La méthode peut comporter plus généralement plusieurs étapes  
itératives de déformation graduelle, avec combinaison à chaque étape d'une  
réalisation composite obtenue à l'étape précédente avec  $q$  nouvelles  
réalisations indépendantes tirées de l'ensemble des réalisations.

20 La méthode permet la déformation graduelle d'un modèle  
représentatif du milieu tout en modifiant les paramètres statistiques relatifs à  
la structure du milieu.

La méthode permet aussi d'effectuer des déformations graduelles  
individuelles de différentes parties du modèle tout en préservant la continuité  
25 entre ces parties (c'est-à-dire par exemple la reproduction d'un variogramme  
attaché à ce modèle).

De préférence, les coefficients de la combinaison linéaire sont des fonctions trigonométriques.

Comme modèle, on peut utiliser un modèle gaussien ou apparenté au type gaussien : modèle lognormal, gaussien tronqué, etc.

- 5 Par rapport à l'art antérieur, la méthode selon l'invention est fondée sur une base théorique plus solide pour la déformation des modèles stochastiques. Elle donne aussi la possibilité de modifier les paramètres (souvent de valeurs incertaines a priori) de variogrammes en même temps que la déformation d'une réalisation d'un modèle stochastique. Enfin, grâce
- 10 à la possibilité des déformations individuelles de différentes parties du modèle, la méthode selon l'invention donne une plus grande souplesse et une plus grande efficacité à l'opérateur pour l'ajustement du modèle stochastique à la réalité des terrains. En cela, la méthode selon l'invention permet de rapprocher l'ajustement des modèles stochastiques de
- 15 l'ajustement des modèles déterministes par zonation traditionnellement employé par les ingénieurs de réservoir.

### **Présentation des figures**

- D'autres caractéristiques et avantages de la méthode selon l'invention, apparaîtront à la lecture de la description ci-après d'un exemple
- 20 non limitatif de réalisation, en se référant aux dessins annexés où :

- la Fig.1 montre un exemple de schéma d'optimisation itérative selon la méthode;
- la Fig.2a représente un exemple de champ de perméabilité lognormal constituant un modèle de référence;

- Fig.2b montre les courbes de pression et de sa dérivée logarithmique issues d'une simulation numérique d'un essai de puits dans le modèle de référence;
- la Fig.3a montre un exemple de champ de perméabilité lognormal associé à une première réalisation du modèle;
- la Fig.3b montre une comparaison entre les courbes de pression associées respectivement à la réalisation 1 et au modèle de référence;
- la Fig.4a montre un exemple de champ de perméabilité lognormal associé à une deuxième réalisation du modèle;
- la Fig.4b montre une comparaison entre les courbes de pression associées respectivement à la réalisation 2 et au modèle de référence;
- les Fig.5a et 5b représentent respectivement les courbes de variation de la fonction objectif en fonction du paramètre  $\rho$  dans une échelle linéaire et dans une échelle logarithmique;
- la Fig.6a montre un exemple de champ de perméabilité lognormal associé à une réalisation contrainte par application de la méthode de déformation;
- la Fig.6b montre une comparaison entre les courbes de pression de la réalisation contrainte et du modèle de référence.

## DESCRIPTION DETAILLEE DE LA METHODE

### 20 Généralités :

La méthode selon l'invention permet de déformer graduellement un modèle stochastique tout en respectant ses caractéristiques statistiques. Cette méthode est opérationnelle dans un cadre gaussien. Combinée avec

une méthode d'optimisation, cette méthode constitue un outil efficace pour calibrer une image du milieu à modéliser à des données non linéaires.

### Déformation graduelle aux paramètres statistiques fixés :

On considère un ensemble de réalisations possibles  $R_i$  d'un modèle stochastique du milieu à modéliser défini par un certain jeu de paramètres statistiques représentatifs (moyenne, variance, variogramme etc.). Ces différentes réalisations  $R_i$  sont obtenues à partir d'un tirage au sort d'un germe aléatoire, deux valeurs successives de ce germe pouvant conduire à des réalisations très différentes l'une de l'autre.

La déformation graduelle du modèle est obtenue selon la méthode par une série de combinaisons itératives des réalisations  $R_i$  du modèle. Comme le montre la Fig.1, la combinaison de base consiste, à partir de deux réalisations  $R_1, R_2$  obtenues par tirage, à former une réalisation  $R_{c1}$  obéissant à la relation :

$$R_{c1} = \alpha_1 \cdot R_1 + \alpha_2 \cdot R_2 \quad (1)$$

avec la condition :

$$\alpha_1^2 + \alpha_2^2 = 1 \quad (2)$$

Cette réalisation combinée se déforme graduellement lorsque l'on modifie graduellement les coefficients  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$ .

A l'itération suivante, on tire une autre réalisation  $R_3$  et on la combine suivant la même règle avec la réalisation combinée précédente  $R_{c1}$

$$R_{c2} = \alpha_3 \cdot R_{c1} + \alpha_4 \cdot R_3$$

Les nouveaux coefficients de la combinaison respectant également la condition :

$$\alpha_3^2 + \alpha_4^2 = 1$$

Si le tirage  $R_3$ , conduit à une réalisation combinée qui ne s'accorde pas suffisamment avec les mesures, on procède à un ou plusieurs tirages successifs jusqu'à l'obtention d'une réalisation satisfaisante.

Le schéma de combinaison précédent peut être étendu facilement à un nombre quelconque de réalisations. A la première étape de combinaison, on tire  $p$  réalisations différentes et on réalise la combinaison suivant la relation :

$$R = \sum_i \alpha_i R_i \quad (3)$$

avec la condition :

$$\sum_i \alpha_i^2 = 1 \quad (4).$$

A chacune des étapes suivantes, on combine la réalisation combinée précédente et  $q$  autres réalisations obtenues par tirage et l'on procède à leur combinaison suivant la même règle.

Suivant un mode avantageux de mise en oeuvre, on combine à chaque étape deux réalisations  $R_1, R_2$  liées par la relation :

$$R = R_1 \cos(\rho\pi) + R_2 \sin(\rho\pi) \quad (5)$$

qui respecte la condition (2).

La minimisation d'une fonction objectif permet de déterminer le coefficient  $\rho$ . Il s'agit d'un problème d'optimisation mono-paramètre.



Dans le cas plus général d'utilisation de  $p+1$  réalisations, on a un problème d'optimisation des  $p$  paramètres  $\rho_i$  ( $i = 1, 2, \dots, p$ ) et les coefficients  $\alpha_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, p$ ) s'écrivent :

$$\begin{cases} \alpha_0 = \prod_{i=1}^p \cos(\rho_i \pi) \\ \alpha_i = \sin(\rho_i \pi) \prod_{j=i+1}^p \cos(\rho_j \pi) \quad (i = 1, p-1) \\ \alpha_p = \sin(\rho_p \pi) \end{cases}$$

5 qui vérifient la condition (4).

#### Déformation graduelle en modifiant les paramètres statistiques:

Lorsque l'on ne dispose pas de valeurs précises des paramètres d'un modèle stochastique, ces paramètres doivent aussi être identifiés par l'inversion. La méthode selon l'invention permet une déformation graduelle  
10 d'une réalisation d'un modèle stochastique en modifiant les paramètres du variogramme. Pour se faire, nous écrivons une réalisation sous la forme suivante :

$$R = L[Y]$$

où  $Y$  est un bruit blanc (réalisation d'un champ gaussien sans corrélation) et  
15  $L$  un opérateur déterminé par le variogramme et permettant de transformer  $Y$  en une réalisation  $R$  respectant ce variogramme. Les techniques à mettre en oeuvre ici, sont bien connues des spécialistes. Une parmi elles est décrite par :

- Oliver, D.S.: "Moving Averages for Gaussian Simulation in two or three  
20 Dimensions", Math. Geology, Vol.27, No.8, 1995.

Nous pouvons ainsi déformer  $Y$  de la même manière que précédemment tout en modifiant l'opérateur de variogramme  $L$  :

$$R = L[Y] = L[Y_1 \cos(\rho\pi) + Y_2 \sin(\rho\pi)]$$

où  $Y_1$  et  $Y_2$  sont deux bruits blancs indépendants l'un de l'autre.

## 5 Déformation graduelle par parties :

Afin d'améliorer l'efficacité du calage d'un modèle à des données non linéaires réparties dans le milieu à modéliser, on peut être amené à diviser le milieu en plusieurs parties et effectuer le calage partie par partie. La méthode selon l'invention permet d'effectuer des déformations graduelles individuelles de différentes parties du milieu à modéliser tout en préservant la continuité entre ces parties. Supposons que le milieu soit divisé en  $n$  parties auxquelles sont associées  $n$  bruits blancs  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ . On peut déformer individuellement ces bruits blancs par l'algorithme précédent, et puis les rendre corrélés par l'opérateur de corrélation  $L$ .

$$15 \quad R = L[Y] = L \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} Y_1' \cos(\rho_1\pi) + Y_1'' \sin(\rho_1\pi) \\ Y_2' \cos(\rho_2\pi) + Y_2'' \sin(\rho_2\pi) \\ \vdots \\ Y_n' \cos(\rho_n\pi) + Y_n'' \sin(\rho_n\pi) \end{bmatrix}$$

où  $Y_i'$  et  $Y_i''$  (pour  $i=1,2,\dots,n$ ) sont deux bruits blancs indépendants l'un de l'autre.

## Extension aux autres modèles:

La méthode de déformation graduelle précédemment décrite peut être utilisée dans les cas de modèles transformés à partir d'un modèle gaussien tels que le modèle lognormal et le modèle gaussien tronqué.

**Exempl de validation:**

La méthode selon l'invention est illustrée ici par une étude synthétique de la contrainte d'un champ de perméabilité à des données de pression issues d'un essai de puits. Un champ de perméabilité synthétique (Fig.2a),  
5 construit selon un modèle stochastique lognormal, est utilisé comme modèle de référence. Un essai de puits numérique est effectué sur ce champ et il en résulte une courbe de pression et sa dérivée logarithmique comme montre la figure 2b. Il s'agit ici de construire une réalisation contrainte par cette courbe de pression autre que l'image de référence.

10 Les Fig. 3a et 4a montrent deux réalisations indépendantes l'une de l'autre du même modèle. On peut constater que les courbes de pression des essais de puits sur ces deux réalisations sont très éloignées de celles du modèle de référence (Fig.3b et 4b). A partir de ces deux réalisations, on a construit une chaîne de réalisations suivant la règle donnée par la formule  
15 (4). Les Fig. 5a et 5b montrent la variation de la fonction objectif en fonction du paramètre  $\rho$  (qui varie entre -1 et 1). Les deux réalisations initiales correspondent respectivement à  $\rho = 0$  et à  $\rho = 0.5$ . On constate que la fonction objectif atteint sa valeur minimum pour  $\rho = -0.3$  environ. En utilisant la méthode du gradient, il suffit de 3 à 4 itérations pour minimiser cette  
20 fonction. La Fig. 6 montre la réalisation correspondant à  $\rho = -0.275$  obtenue par optimisation et l'on peut constater que le calage à l'essai de puits de cette réalisation est très satisfaisant.

## REVENDECATIONS

1) Méthode pour déformer graduellement une partie au moins de réalisations d'un modèle stochastique de type gaussien ou apparenté d'un milieu hétérogène tel qu'une zone souterraine, contraint par un ensemble de paramètres relatifs à la structure du milieu, caractérisée en ce qu'elle comporte le tirage d'un nombre  $p$  au moins égal à deux, de réalisations indépendantes ( $R_i$ ) d'une partie au moins du modèle choisi du milieu, parmi toutes les réalisations possibles et au moins une étape de déformation graduelle du modèle en effectuant une combinaison linéaire des  $p$  réalisations initiales indépendantes, les coefficients ( $\alpha_i$ ) de cette combinaison étant tels que la somme de leurs carrés est égale à 1.

2) Méthode selon la revendication 1, caractérisée en ce qu'elle comporte plusieurs étapes itératives de déformation graduelle, avec combinaison à chaque étape d'une réalisation composite obtenue à l'étape précédente avec  $q$  nouvelles réalisations indépendantes tirées de l'ensemble des réalisations.

3) Méthode selon la revendication 1 ou 2, caractérisée en ce qu'elle comporte la déformation graduelle d'un modèle représentatif du milieu tout en modifiant les paramètres statistiques relatifs à la structure du milieu.

4) Méthode selon la revendication 1 ou 2, caractérisée en ce qu'elle comporte des déformations graduelles individuelles de différentes parties d'un modèle représentatif du milieu tout en préservant la continuité entre ces parties.

5) Méthode selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que les coefficients ( $\alpha$ ) de la combinaison linéaire sont des fonctions trigonométriques.

5 6) Méthode selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que l'on utilise un modèle apparenté au type gaussien tel qu'un modèle lognormal ou gaussien tronqué.

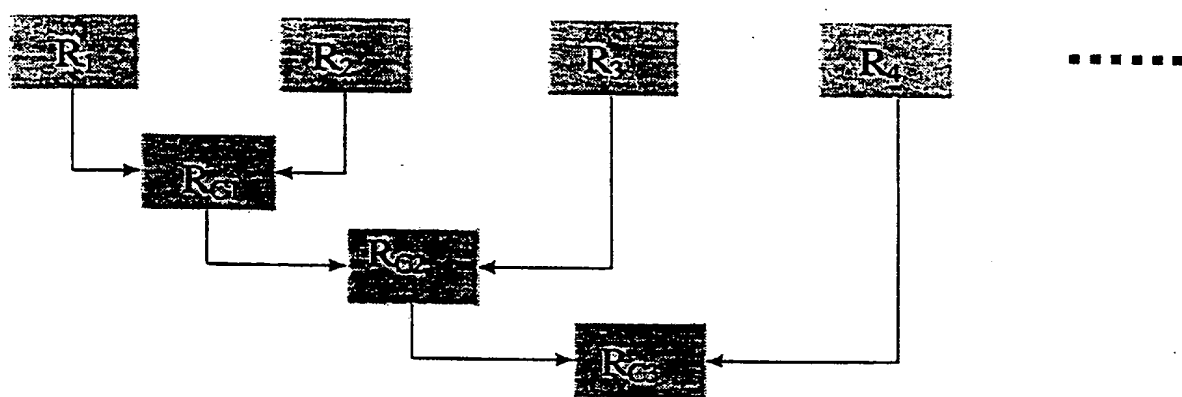


Fig.1

2/6



Fig.2a

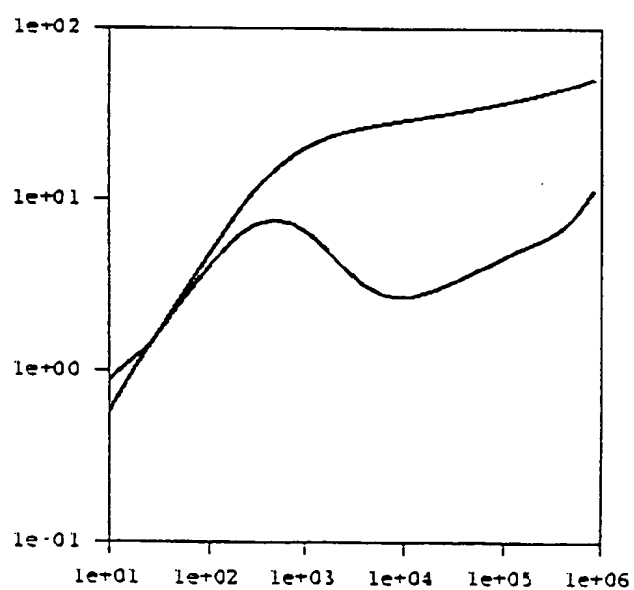


Fig.2b

3/6



Fig.3a

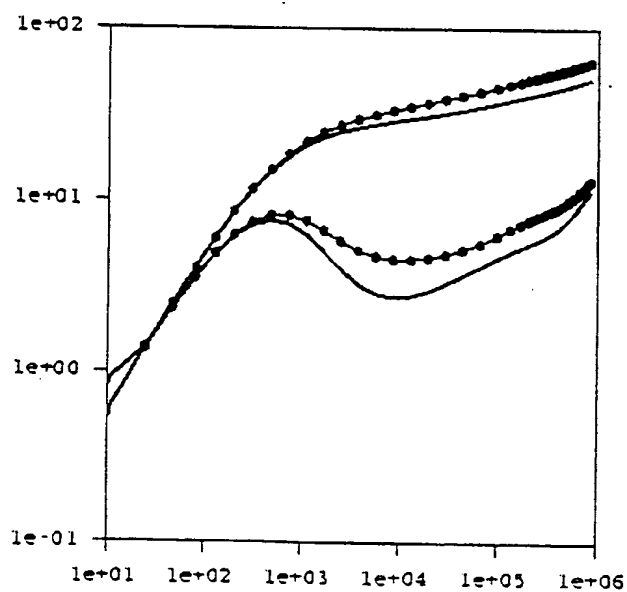


Fig.3b



4/6



Fig.4a

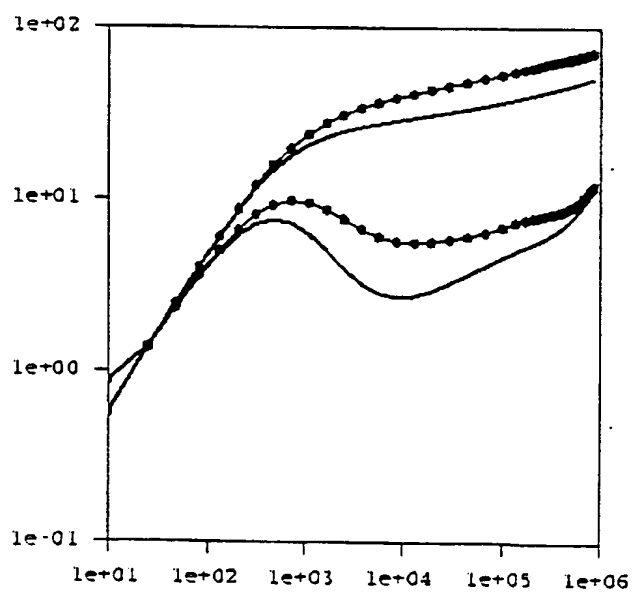


Fig.4b

5/6

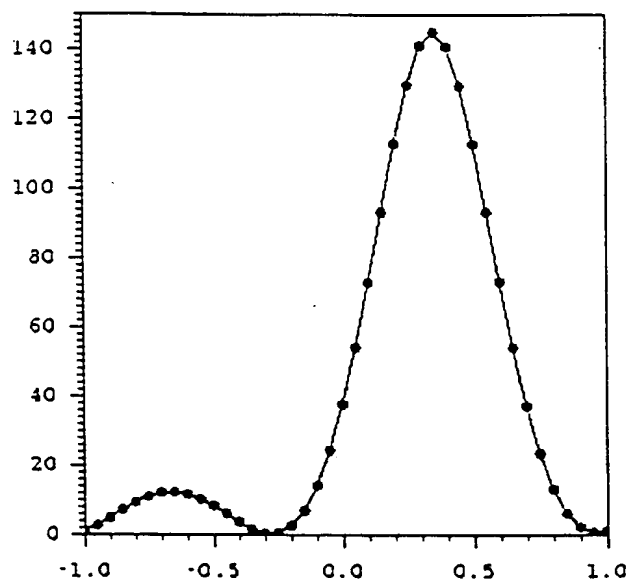


Fig.5a

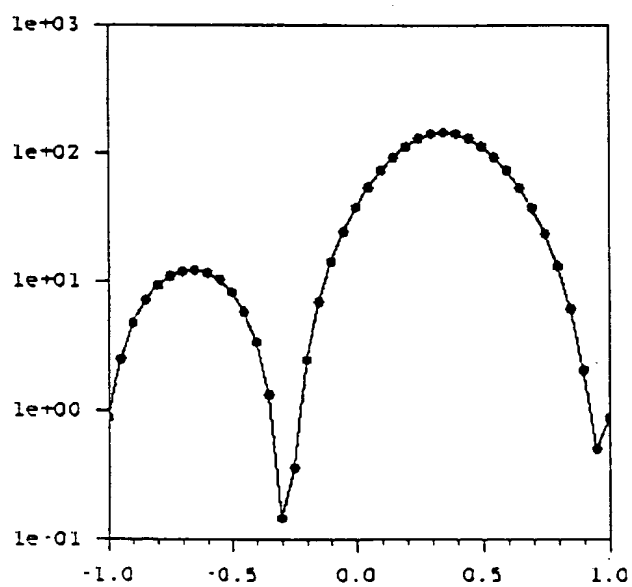


Fig.5b



Fig.6a

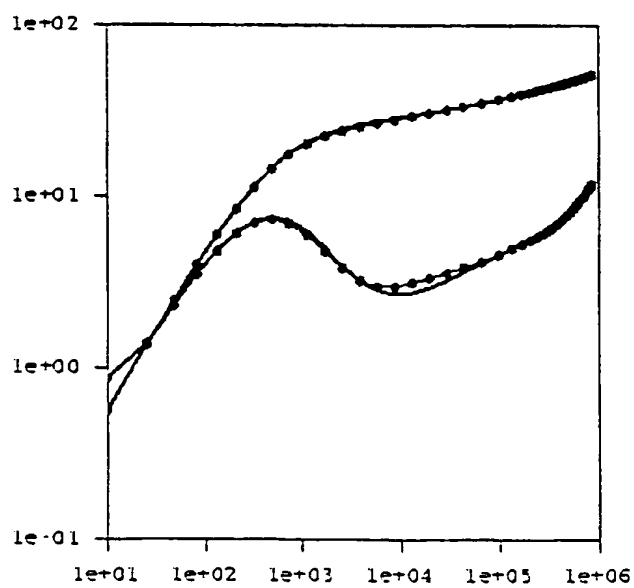


Fig.6b



INSTITUT NATIONAL  
de la  
PROPRIETE INDUSTRIELLE

**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRELIMINAIRE**  
établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement  
national

FA 559373  
FR 9809018

| DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS   |  | Revendications<br>concernées<br>de la demande<br>examinée |
|---|--|---|
| Categorie   | Citation du document avec indication, en cas de besoin,<br>des parties pertinentes   |   |
| Y   | EP 0 567 302 A (IBM) 27 octobre 1993<br>* page 3, colonne 4, ligne 53 - ligne 56 *<br>* page 4, colonne 5, ligne 11 - ligne 33 *<br>* page 5, colonne 7, ligne 45 - colonne 8,<br>ligne 5 *<br>* page 6, colonne 10, ligne 48 - ligne 53<br>*<br>* page 7, colonne 11, ligne 11 - colonne<br>13, ligne 4 * | 1,3   |
| Y   | CARR JAMES R ET AL: "Use of geostatistics<br>for accurate mapping of earthquake ground<br>motion"<br>GEOPHYSICAL JOURNAL,<br>vol. 97, 1989, pages 31-40, XP002097135<br>* page 32, ligne 4 - page 35, ligne 4 *  | 1,3   |
| A   | US 5 416 750 A (DOYEN PHILIPPE M ET AL)<br>16 mai 1995<br>* abrégé; revendication 1 *  | 1   |
| A   | DE MARSILY GHISLAIN: "Quantitative<br>Hydrogeology"<br>1986, ACADEMIC PRESS, INC XP002097136<br>* page 300, ligne 20 - page 304, ligne 1 *   | 6   |
|   |  | DOMAINES TECHNIQUES<br>RECHERCHES (Int.CL.6)              |
|   |  | G01V  |
| Date d'achèvement de la recherche   |  | Examineur   |
| 19 mars 1999  |  | Lorne, B  |
| CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES   |  |   |
| X : particulièrement pertinent à lui seul<br>Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un<br>autre document de la même catégorie<br>A : pertinent à l'encontre d'au moins une revendication<br>ou arrière-plan technologique général<br>O : divulgation non-écrite<br>P : document intercalaire                                  |  |   |
| T : théorie ou principe à la base de l'invention<br>E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure<br>à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date<br>de dépôt ou qu'à une date postérieure.<br>D : cité dans la demande<br>L : cité pour d'autres raisons<br>& : membre de la même famille, document correspondant |  |   |

2

EPO FORM 1503 03 92 (P04C13)

